

柱面阵天线阵面的风机失效对散热影响研究

王业文 张 帅 朱乐乐 刘伟栋 赖国泉
(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)



摘要: 本文以风机沿圆周方向排布的柱面相控阵天线阵面风冷散热系统为研究对象, 对散热系统理论计算, 并采用有限元法对流场仿真分析, 对计算结果校核, 在此基础上分析和总结了不同风机失效对系统散热性能的影响, 基于分析结果提出局部散热加强改造方案, 并采用有限元分析对改造后的散热系统进行了性能评估, 为风机失效后优化设计提供参考。

关键词: 柱面相控阵天线; 风冷散热; 有限元分析; 风机失效
中图分类号: V476 **文献标识码:** A

Influence of Fan Failure on the Heat Dissipation of Cylindrical Phased Array Antenna

Wang Yewen Zhang Shuai Zhu Lele Liu Weidong Lai Guoquan
(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109)

Abstract: In this paper, the air-cooling heat dissipation system of cylindrical phased array antenna arranged along the circumferential direction of the fan is the research object, and the heat dissipation system is theoretically calculated. The finite element method was used to carry out simulation analysis and check calculation results. On this basis, the influence of different fan failures on the heat dissipation performance of the system is analyzed and summarized, and a local heat dissipation enhancement scheme is proposed based on the analysis results. The finite element analysis is used to evaluate the performance of the modified heat dissipation system to provide a reference for the optimization design of the fan after failure.

Key words: cylindrical phased array antenna; air-cooled heat dissipation; finite-element analysis; fan failure

1 引言

有源相控阵雷达的核心部件为有源相控阵天线^[1], 典型的有源相控阵天线主要由天线单元、T/R 模块、射频网络模块、阵面电源、控制模块、天线罩以及用于阵面支撑、旋转的框架等组成^[2]。这些有源组件和电子设备由大量功率器件组成, 随着器件集成化程度的不断提高, 加上体积大小的限制, 使得功率器件的热流密度不断提高, 极易达到器件的额定温度, 导致器件发生故障或者损坏。“10℃”法则指出, 电子元件的工作温度每上升 10℃, 它的工作可靠性就会降低

50%^[3], 因此, 有源相控阵天线的散热已经成为制约有源相控阵雷达的关键技术。

针对不同型号的天线散热系统, 要以天线本身的特点、特性和实际情况为依据, 并符合以下设计原则: a.良好的散热; b.较高的可靠性和安全性; c.较强的环境适应能力; d.方便维修与保养; e.良好的性价比^[4]。目前比较成熟的散热方案一般是采用风冷和液冷的方式。相控阵雷达主要工作在野外人烟稀少的地区, 环境比较恶劣, 对安全性和可靠性要求较高。液冷相对风冷在比热容和对流换热系数上有巨大的优势, 但为保证整个系统的均温性, 需要在每个 T/R 组件盖板内

作者简介: 王业文 (1982), 高级工程师, 机械设计及理论专业; 研究方向: 天线结构设计。

收稿日期: 2023-04-11

设置流道，流道管网较为复杂，同时风冷系统的维修性和成本相对液冷系统来说大大降低，故采用强迫风冷散热情况居多。风冷散热系统中，风机的正常稳定直接关系到设备的可靠性与安全性。本文以柱面相控阵天线风冷散热系统为研究对象，针对阵面天线结构及热耗分布特点，建立天线有限元热分析模型，同时针对风机失效对散热性能的影响进行评估和改进，为风冷散热系统优化设计提供参考。

2 柱面相控阵雷达天线散热系统设计

柱面相控阵雷达天线阵面为双极化半圆柱波导缝隙阵，其结构形式如图1所示，天线阵面共40个T/R模块，沿圆周方向排布，形成一个柱面阵，相邻2个T/R模块夹角为7°；柱面半径760mm。

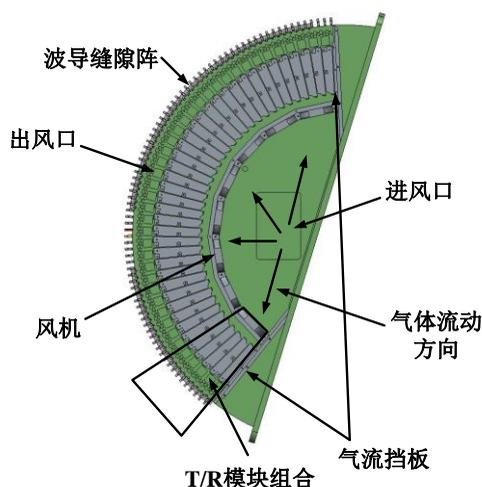


图1 柱面阵天线散热系统结构形式

2.1 热环境分析

阵面主要热量来源为T/R组件工作时产生的热耗，阵面单个T/R模块热设计功耗为31.8W，总热耗1272W。T/R模块内部的移相器是温度敏感元件，不同温度下的移相量也不同，为了保证雷达测量的精度，需要对不同温度下工作的移相器的移相量进行补偿，而温度差异的增大，补偿模型越发复杂，补偿精度也随之降低^[5]。因此，阵面天线热设计除控制温度外，温度差也必须控制在可接受的范围内（一般小于10℃）。

相控阵雷达天线主要使用环境在野外无遮挡环境，故需要考虑太阳辐射对阵面的影响，太阳辐射在12:00~13:00间最强，辐射强度为1120W/m²^[6]，太阳辐射直接照射在天线罩上，热量一部分被吸收，一部分被反射，被天线罩吸收的热量以热传导的形式输送

到天线阵面。根据辐照强度计算公式：

$$Q = P_{\text{solar}} \times \varepsilon \times S$$

式中， P_{solar} 为太阳辐照强度， ε 为太阳辐射吸收率， S 为光照角面积。

天线罩表面涂白色聚氨酯漆，对太阳的热辐射吸收率约为0.2，天线阵面俯仰旋转55°时，太阳辐射最严重，此时天线罩的倾角按16.5°计算，太阳照射面积按天线罩投影面积计算，天线阵面投影长1.535m，宽1.683m，根据式（1），本天线太阳辐射的热量约为556W，整个天线阵面总热耗为1828W。

2.2 散热系统适配

风冷散热系统核心部件为风机，结合T/R组件安装形式选择轴流风机作为动力源，整个阵面热耗1828W，T/R组件共40块，根据将扇形面等分为8处，使用8个风机进行散热，单个风机需要转换的热量为228.5W，根据热转化公式：

$$P = \rho \times C_{p,\text{air}} \times Q_V \times \Delta T$$

其中， P 为需要转化的热量， $C_{p,\text{air}}$ 为空气比热， Q_V 为空气体积流量， ΔT 为温差， ρ 为空气密度，取空气30℃时物理性质，此时空气密度为1.165kg/m³，比热容为1.005kJ/(kg·℃⁻¹)，公式变换后可得风量公式：

$$Q_V(\text{m}^3/\text{min}) = 0.05 \times P / \Delta T$$

热源温升需控制在20℃以内，考虑到冷板至热源间的热阻，需将空气进出口温差控制在10℃以内，需要的风量为1.14m³/min，所选风机最大风量一般为所需风量的两倍，因此风扇最大风量约为2.28m³/min。

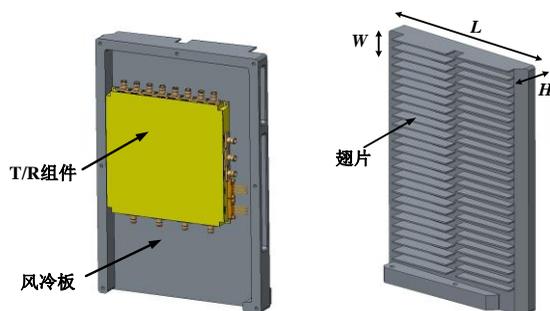


图2 T/R模块结构示意图

由于T/R组件表面积较小，为加强对流换热，在组件外部加装平行翅片散热器，增加组件与气流的换热面积。考虑到加工难度和成本，翅片间距 W 为7.5mm，高度 H 为16.5mm，沿气流方向长度 L 为150mm，翅片数量为26，T/R模块结构示意图如图2所示。取空气30℃时物理性质，此时运动粘度为 $6 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ ，翅片内流体的流动可等效为矩形管道内流

动, 风道风压(静压)计算过程如下:

翅片内单个风道截面湿周长为:

$$U=(W+H)\times 2=48\text{mm}$$

单个通风截面当量直径为:

$$d=4A/U=20\text{mm}$$

假设各风道风量均匀, 可计算单风道风速为:

$$V=Q_{v,\max}/(25\times 5\times A)=2.45\text{m/s}$$

雷诺数为:

$$Re=(V\times d)/\nu=8.2\times 10^3$$

气体流经翅片的过程中截面未发生变化, 因此只考虑流动时与壁面摩擦产生的沿程阻力损失 h_f , 其计算式^[7]为:

$$H_f=\lambda\times L\times V^2/(2d\times g)$$

其中, λ 为沿程阻力系数, $4000\leq Re<10^5$ 时, 可以用勃拉修斯公式计算, 即:

$$\lambda=0.3164/Re^{0.25}$$

代入上式计算出单风道内沿程阻力损失为 0.075Pa, T/R 模块组合内总沿程阻力损失为 9.4Pa。通风出口的出风压力为: $P=V^2\times\rho/2=3.5\text{Pa}$, 则风机理想情况下需要的总风压不低于 12.9Pa, 考虑到实际过程中由于安装方式对风阻的影响, 根据空间尺寸, 风机选择为 EBM 的 4414 FM 款, 最大风量 $140\text{m}^3/\text{h}$, 最大风压 40Pa, 满足使用要求。

3 天线阵面传热特性数值模拟研究

由于阵面结构及气流循环过程较为复杂, 故采用有限元法对阵面空间内部流场和温度场进行分析, 以验证整个设计过程的准确性。本文采用 ANSYS ICEPAK 软件对阵面流场和温度场进行仿真计算, 其具有物理模型库丰富、自动网格生成、流体解算功能强大等优点^[8], 仿真结果可以作为校核阵面散热设计的依据。

3.1 边界条件设置

本文模拟气体流动换热与固体导热的耦合传热问题, 控制方程的求解采用 zero equation 算法, T/R 组件与散热翅片外壳间热阻设置为 $0.001\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$; 各散热器外壳间距离较近, 为防止外壳间传热, 模拟实际工况, 外壳间设置绝热薄板(无厚度)。各散热器外壳、挡板、模块外壳等材料为铝合金 5A06, 内部流动工质为空气, 环境温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.2 模型简化分析

为减少网格数量增加关注区域的计算精确度, 在

不影响模型热流传递路径和流道流阻的情况下, 对模型进行简化, 去除不影响计算结果的螺钉、定位销等零件以及加工时的圆角、倒角等特征。为对比分析, 设置两种计算模型, 一种为单个 T/R 模块组合, 即一个风机对应 5 个 T/R 模块, 另外一种模型取 8 组对称分布 T/R 模块组合的一半, 将扇形平面从中间剖开, 各风机编号如图 3 所示, 研究 4 组模块在风机扇形排布下的流场和温度场。

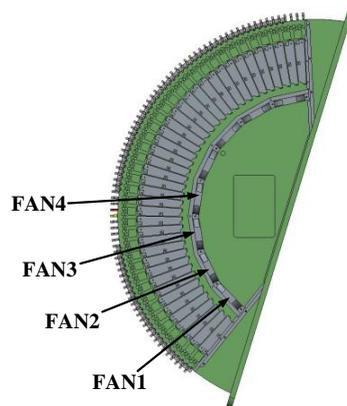


图 3 风机编号示意图

3.3 仿真结果分析

单个 T/R 模块组合和 4 个 T/R 模块组合温度分布云图分别如图 4 和图 5 所示, 发热器件处温度最高, 单个 T/R 模块组合最高温度约为 $33.4\text{ }^\circ\text{C}$, 但 4 个 T/R 模块扇形排列后最高温度上升为 $37.4\text{ }^\circ\text{C}$ 。单个风机工作点为 FAN0 ($P_0=14.3\text{Pa}$, $Q_0=1.737\text{m}^3/\text{min}$), 4 组风机工作点分别为: FAN1 ($P_1=19.3\text{Pa}$, $Q_1=1.308\text{m}^3/\text{min}$)、FAN2 ($P_2=21.5\text{Pa}$, $Q_2=1.308\text{m}^3/\text{min}$)、FAN3 ($P_3=21.4\text{Pa}$, $Q_3=1.13\text{m}^3/\text{min}$)、FAN4 ($P_4=20.5\text{Pa}$, $Q_4=1.208\text{m}^3/\text{min}$), 风机呈扇形排布后互相之间存在干扰, 空气流动风阻相对独立风机大约 5Pa, 根据风机特性曲线, 流过翅片的风量减小, 四组风机比单独风机温度高约 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 。4 个 T/R 模块组合各热源间温差约为 $3\text{ }^\circ\text{C}$, 温度均匀性良好, 满足使用要求。

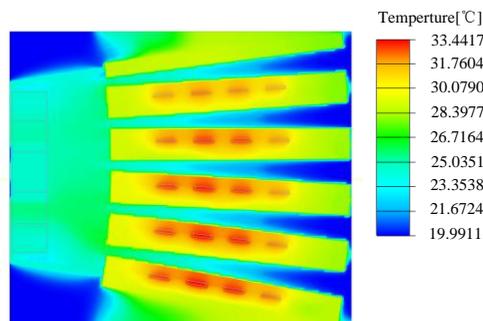


图 4 单个 T/R 模块组合温度分布图

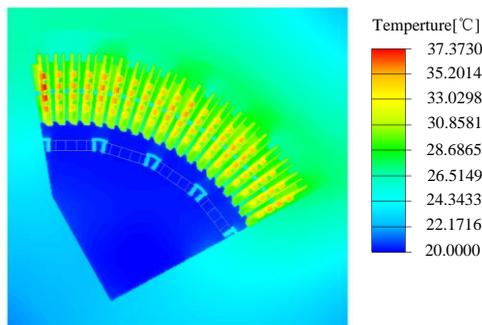


图5 4组T/R模块组合温度分布图

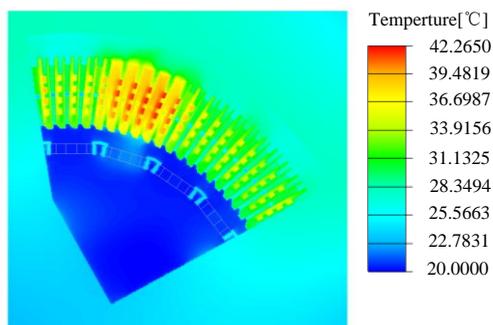


图7 FAN2失效时温度分布云图

4 风机失效的影响及优化

4.1 风机失效对阵面温度的影响

在风冷散热系统中，保证风机的正常稳定运行非常重要，直接关系到整个系统的可靠性与安全性^[9]。一般来说，风机寿命要小于元器件寿命，且由于不确定因素的影响如偶尔的电动机烧毁或轴承卡住，都会造成风机失效。失效的风机不仅影响该风机对应流道内部的散热，对周围风机也存在影响。本章以4个T/R模块组合为研究对象，分析各风机失效后对流场和温度场的影响。

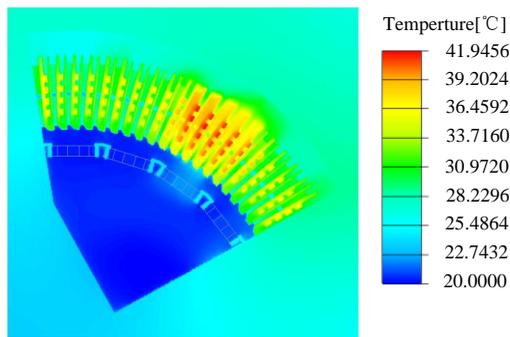


图8 FAN3失效时温度分布云图

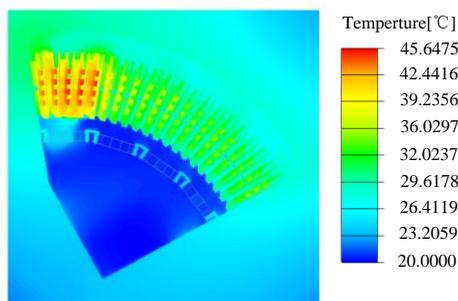


图6 FAN1失效时温度分布云图

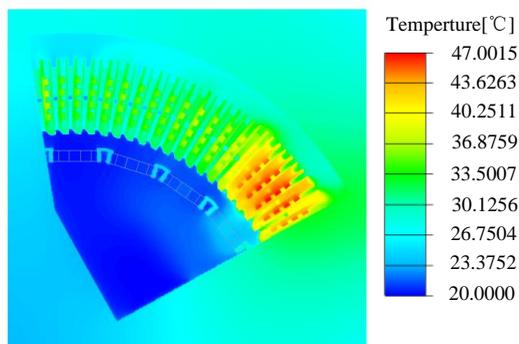


图9 FAN4失效时温度分布云图

表1 失效时风机工作点及温度参数

	无失效		FAN1失效		FAN2失效		FAN3失效		FAN4失效	
	风压 /Pa	风量 /m ³ ·min ⁻¹								
FAN1	19.3	1.308	/	/	16.5	1.544	17	1.505	17.2	1.486
FAN2	21.5	1.123	16.9	1.507	/	/	17.3	1.48	18.3	1.393
FAN3	21.4	1.13	18.4	1.382	17	1.505	/	/	17.1	1.491
FAN4	20.5	1.208	18.7	1.358	18.1	1.406	17.1	1.493	/	/
最高温度/°C	37.4		45.6		42.3		41.9		47	
温差/°C	5.8		13.6		10.3		8.9		14.3	

图6~图9中展示了各处风机失效时温度分布云图，风机工作点风压和风量值如表1所示，FAN3失效对整个散热系统影响最小，失效风机流道处热源温度相对无失效时温升约为5°C，FAN4失效对散热系统影响最大，

失效风机流道处热源温度相对无失效时温升约为10°C，其余正常工作的风机处热源温度相对无失效时下降了约1~2°C。风机失效，均使周围风机的风阻减小，风量增大，风机在进风口为低压，出风口为高压，失效的风

机在局部形成相对负压，对周边空气流动形成短路效应，失效风机所对应的流道内部会有少量气流循环，因此 FAN2 和 FAN3 失效对阵面温度的影响相对 FAN1 和 FAN4 失效更小。

4.2 降低风机失效影响的方法

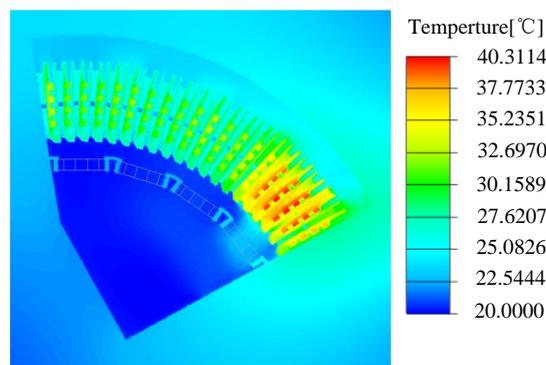


图 10 风机更改后温度分布云图

气体流动主要由压力所决定，在空间内任一点的空气都有多条流动路径可以选择，每条路径上都有不同的流阻和压力梯度。风机失效后的理论模型可近似为一定开孔率的通风孔，由于相邻风机出风口为高压状态，在失效风机和正常工作的风机间形成压力差，促使少量气流流经翅片，因此降低风机失效对整个散热系统影响的成本较低的方法为增加系统冗余度，即增大风机风量和风压，以 EBM 尺寸相同的 4414FNN 风机为例，风量提高至 $200\text{m}^3/\text{h}$ ，风压为 155Pa ，以对散热影响最大的 FAN4 失效模型进行分析，仿真结果如图 10 所示，从图中可以看出，热源最高温度降低至 40.3°C ，基本满足使用要求，因此以该风机作为整个系统的散热风机。

5 结束语

本文以相控阵雷达天线阵面为研究对象，建立散热系统数学模型，并通过数值仿真对系统进行校核，仿真结果表明，散热系统的设计能满足 T/R 组件的散热要求，为柱面阵的散热设计提供理论指导。同时论证了风机失效对散热系统的影响，提出解决风机失效问题的方案，提高整个风冷散热系统的可靠性，保证柱面相控阵天线的稳定工作。

参考文献

- 1 邱丽原. 相控阵雷达天线模型及仿真[J]. 海军航空工程学院学报, 2014, 29(2): 151~155
- 2 刘淑振, 胡玲珊, 程龙宝, 等. 某宽带雷达数字阵列模块的热设计及仿真分析[J]. 航天制造技术, 2021(4): 35~39
- 3 李振东, 张卿, 郭建平. 机载电子模块热设计方案评估[J]. 机械研究与应用, 2023, 36(1): 170~172+176
- 4 王燕玲, 陈峻山, 刘亚龙, 等. 相控阵雷达导引头热设计技术和发展趋势[J]. 制导与引信, 2022, 43(4): 24~29
- 5 Mike S. SAMPSON M Active Phased Array Antenna[C]// Phased Array Systems and Technology. IEEE International Symposium on. IEEE, 2003: 119~123
- 6 Han J C, Glicksman L R, Rohesenow W M. An investigation of heat transfer and friction for rib-roughened surfaces[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1978, 21(8): 1143~1156
- 7 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006
- 8 赵如意, 许可豪. 基于 ICEPAK 的液冷冷板散热结构的优化设计[J]. 电子制作, 2022, 30(11): 85~87
- 9 张学林. 装载机冷却风扇驱动特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013